

細胞性粘菌の子実体の形態形成に関する研究

函館工業高等専門学校

○垣田幸子 高橋陽子 竹原直美 石若裕子

要旨

多細胞期の細胞性粘菌は、独立して行動できる細胞から構成されているにもかかわらず、全体としては一定の形態を形成する。粘菌は、はじめ均質だった細胞が2種の機能の異なる細胞に分化して全体として形態形成を行う。本研究ではその生態に倣ったモデルを作成し、細胞性粘菌の多細胞体が環境に適合した形態を獲得するまでの過程をシミュレーションすることを試みる。

1. はじめに

細胞性粘菌は、単細胞生物と多細胞生物、動物と植物、といった要素を兼ね備えた生物である。餌の減少によって種全体の危機が訪れると、それまで互いに関連なく活動していた細胞が集合し、2種の細胞に分化しながら様々な形態を形成する。本研究では、細胞性粘菌（キイロタマホコリカビ：Dictyostelium discoideum）の多細胞体をマルチエージェント系と見なし、分化などの個々の細胞の振る舞いから、全体としての形態が創発することを目的として、形態を獲得するまでの過程についてシミュレーションを行う。

2. 細胞性粘菌

2.1 生活環

細胞性粘菌の生活環を図1に示す。細胞性粘菌は、単細胞期には粘菌アメーバというアメーバ状の形態をしていて、個々に食餌、分裂を繰り返す。しかし、餌が少なくなって種全体が危機に陥ると、それまで全く関連なく動いていた細胞が集合・凝集し、多細胞期に入る。多細胞期においては、細胞が凝集した形態である集合期を経て、移動体という“なめくじ状”の形態で光を求めて這い回る。その後、子実体という“つくし状”の形態となる。子実体の先端部には胞子が詰まっている。これが発芽して粘菌アメーバが生まれる。

多細胞期において、移動体の段階までは細胞は動物細胞の構造（細胞膜で隔てられている構造）であるが、子実体においては、細胞は植物細胞の構造（細胞壁で隔て

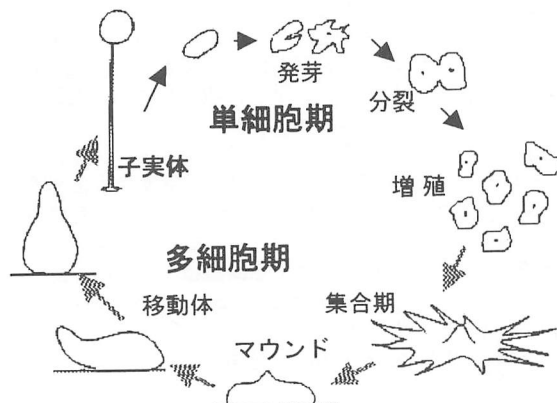


図1 細胞性粘菌（キイロタマホコリカビ）の生活環

られている構造)に変化する。

2.2 分化

多細胞期において、細胞は予定柄細胞と予定胞子細胞という、別の機能を持った2種類の細胞に分化する。予定柄細胞は子実体の柄や台にあたる部分になり、予定胞子細胞は子実体先端で胞子に分化する。どちらの細胞に分化するかは、集合時の集団内での位置や、サイクリックAMPの濃度勾配などによって決まる。

2.3 サイクリックAMP及びレセプター

サイクリックAMP (cAMP) は、キイロタマホコリカビにおける走化性物質である。多細胞期においては、細胞が予定柄細胞と予定胞子細胞のどちらに分化するかを決定する非常に重要な因子である。cAMPは細胞の内部と外部両方に作用し、細胞間の通信や分化の促進などに用いられる。細胞は、4種類のそれぞれ発現時期と感度が異なるcAMPレセプターを持っていて、それにより外部のcAMPを感知することができる。また、細胞内部にもcAMPの濃度がある。

2.4 マウンドから移動体への形態変化

形態変化の様子を図2に示す。細胞性粘菌は、集合期を経て、予定柄細胞と予定胞子細胞がまざりあうマウンドという状態になる。マウンドの前後の状態では、予定柄細胞と予定胞子細胞の位置関係が逆転する。マウンドの次の状態（乳頭突起を有する集合塊）では、予定柄細胞が上のほうに来る配置になる。

3. 手法

3.1 細胞のモデル

多細胞体の形態を、細胞性粘菌の細胞をエージェントとするマルチエージェント系により2次元空間上でシミュレーションする。粘菌モデルの形状は円とし、形状は変化しないものとする。

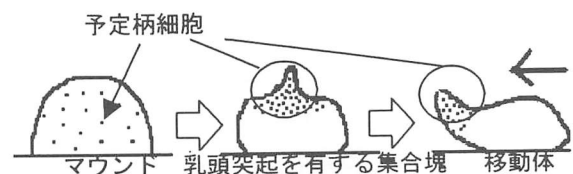


図2 マウンドから移動体への形態変化

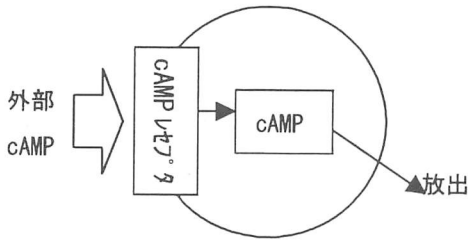


図3 cAMPの伝送経路

3.1.1 cAMP

cAMPには、内部cAMPと外部cAMPがある。内部cAMPは粘菌モデルが内部に持っているcAMPであり、外部cAMPは他の粘菌モデルが発したcAMPである。外部cAMPは、cAMPレセプターを通して受け取られる(図3)。本モデルではレセプターは1種類のみとした。

cAMPは多細胞期においては分化の因子として重要である。本モデルでは、cAMPの濃度のみを分化の因子として仮定している。

3.1.2 粘菌モデルの行動ルール

粘菌モデルには、図4に示す力が働く。 g は重力加速度、 η は粘性であり、それぞれ重力と粘性力の大きさを決定する。

予定柄細胞と予定胞子細胞はそれぞれ行動ルールが異なる。

予定柄細胞：

- ・ 自分を中心とする一定範囲内の内部cAMP濃度が低い個体に近づく。
- ・ 多細胞体内で高い位置に移動する。

予定胞子細胞：

- ・ 自分を中心とする一定範囲内の内部cAMP濃度が高い個体に近づく。

3.1.3 モデルのパラメータ

モデルは、cAMP濃度、粘性、重さ、cAMPレセプター、半径、どちらかに分化しているかのフラグ、のパラメータを持つ。

4. 実験

提案したルールによる形態形成の可否について調べるため、移動体初期の予定柄細胞と予定胞子細胞の位置の振り分けについてのシミュレーションを行った。

実験パラメータ

画面サイズ：800×400[pixel]、半径：5[pixel]、

重さ：1、粘菌モデル数：100、

cAMP濃度： $\exp(\text{num}/100) / \exp(1)$
(num番の粘菌モデルに対して)

cAMP > 0.55 で予定胞子細胞に分化

cAMP ≤ 0.55 で予定柄細胞に分化

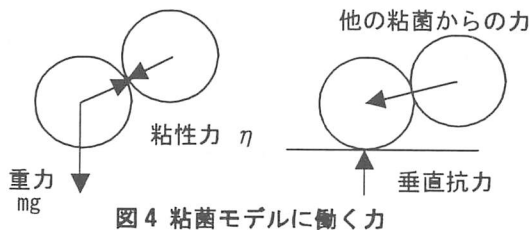


図4 粘菌モデルに働く力

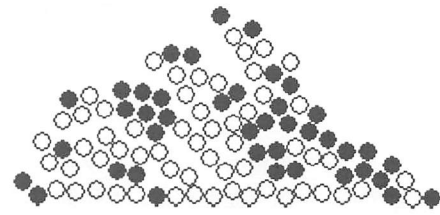


図5 粘性が大きい場合 $g = 9$, $\eta = 80$

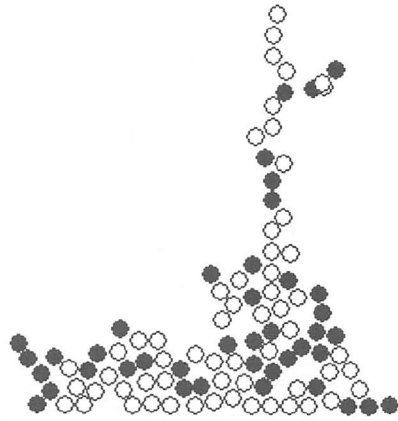


図6 粘性が小さい場合 $g = 9$, $\eta = 10$

実験時の最終的な形態とパラメータを図5および図6に示す。●は予定柄細胞、○は予定胞子細胞を表す。

粘性、重力加速度の2パラメータを変化させることにより、多様な形態を得ることができた。図5、図6はその一例である。しかし、 η の大小にかかわらず、予定柄細胞と予定胞子細胞がまざりあって振り分けが行われていないことが分かる。原因は、実物の粘菌についての渦による細胞の振り分けを考慮しなかったこと、適用した物理条件やルールが適切でなかったことが考えられる。

5. おわりに

本研究では、ルールによるマルチエージェント系の形態形成について二次元空間でシミュレーションを行った。その結果、パラメータを変えることによって多様な形態を得ることができた。今後の課題としては、ルールと物理法則の再検討、シミュレーション環境の3次元化、学習による形態の獲得、粘菌モデル形状の可変性が挙げられる。

謝辞

本研究の遂行にあたって、産業技術総合研究所生物機能工学研究部門の水野敬文氏に多大なご教示とご協力を頂いたことに対し、ここに心からの感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 前田靖男：モデル生物：細胞性粘菌，アイピーシー，2000年
- 2) 沼岡千里、大沢英一、長尾確：マルチ粘菌モデルシステム，共立出版，1998年